

## 周期性干旱下桂花滞尘能力的变化及其生理响应

杨琳曦<sup>1</sup>,王剑武<sup>2</sup>,张晶<sup>3</sup>,陈健<sup>1\*</sup>

(1. 浙江农林大学 林业与生物技术学院, 浙江 杭州 311300; 2. 浙江省森林资源监测中心, 浙江 杭州 310007;  
3. 亚热带森林培育国家重点实验室, 浙江 杭州 311300)

**摘要:**干旱的反复发生会导致植物自身产生胁迫记忆,进而会对植物的滞尘能力产生影响,然而,干旱胁迫记忆如何影响植物的滞尘效率及植物的生理响应和适应尚未明确。通过向开顶式气室(OTCs)内输送机动车尾气,停止供水达到干旱,分别设置尾气胁迫组(P)、干旱胁迫组(D)、双胁迫组(PD)和对照组(CK)4个处理组。每个周期性胁迫设置为期12 d,恢复期也为12 d。结果表明,桂花叶片表面滞尘量在P组下由S1周期的 $33.77 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 下降到S3的 $21.32 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ ,PD组下由S1周期的 $38.08 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 下降到S3的 $25.70 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ ;蜡质层滞尘量在P组呈显著性下降( $P < 0.001$ ),在PD组中下降不显著。植物体内抗氧化酶活性随着周期处理而逐渐减小,可溶性糖含量先上升后下降,叶绿素含量与颗粒物在第2阶段呈显著负相关,第3周期并无显著相关性。表明反复干旱下提高了植物生理对胁迫的适应性,说明植物的胁迫记忆可以帮助植物更好地应对再次到来的胁迫。

**关键词:**颗粒物污染;周期性干旱;叶片滞尘能力;蜡质层;胁迫记忆

**中图分类号:**S685.13 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2024)02-0166-07

## Effects of Particle Retention Capacity and Physiological Responses of *Osmanthus fragrans* Under Periodic Drought

YANG Lin-xi<sup>1</sup>, WANG Jian-wu<sup>2</sup>, ZHANG Jing<sup>3</sup>, CHEN Jian<sup>1\*</sup>

(1. School of Forestry and Biotechnology, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China;  
2. Zhejiang Forest Resources Monitoring Center, Hangzhou 311300, Zhejiang, China;  
3. State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A&F University, Hangzhou 311300, Zhejiang, China)

**Abstract:** Recent studies have shown that repeated occurrences of drought can lead to drought stress memory formation in plants. However, how the retention of particulate matter (PM) of plants changes under drought and how the drought stress memory of plants affects the PM retention efficiency and physiological response of plants have not been clarified. In this study, we add vehicle exhaust gas into open-top chambers (OTCs) and stop water supply to imitate stress. We set up four treatment groups: particulate matter stress group (P), drought stress group (D), particulate matter  $\times$  drought stress group (PD) and control group (CK). Each periodic stress lasted for 12 days, and the recovery period was for 12 days too. The PM retention of *Osmanthus fragrans* showed that the PM retention on the leaf surfaces under particulate matter stress (P) declined from  $33.77 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$  in S1 to  $21.32 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$  in S3, and from  $38.08 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$  in S1 to  $25.70 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$  in S3 under particulate matter  $\times$  drought stress (PD). The PM retention in waxy layer decreased significantly under particulate matter stress ( $P < 0.001$ ), but not significant under particulate matter  $\times$  drought stress treatment. The determination of physicochemical properties of plants showed that

收稿日期:2023-01-21 修回日期:2023-06-08

基金项目:国家自然科学基金项目(41471442);浙江省林业科技项目(2022SY04)。

第一作者:杨琳曦。研究方向:林业生态工程。E-mail:409951732@qq.com

\*通信作者:陈健,教授。研究方向:退化森林生态系统生态恢复、生态环境监测与评估、城市生态。E-mail:chenjian@126.com

the antioxidant enzyme activity in plants gradually decreased with the periodic treatment, the soluble sugar content first increased and then decreased, and the chlorophyll content was significantly and negatively correlated with particulate matter in the second stage, but there was no significant correlation in the third cycle. This shows that repeated drought improves the physiological adaptability of plants to stress, indicating that plant stress memory can help plants better cope with the re-arrival stress.

**Key words:** particulate pollution; periodic drought; leaf PM retention; waxy layer; stress memory

由于机动车数量的快速增长,机动车尾气排放已成为城市大气颗粒物污染的主要来源之一<sup>[1-2]</sup>,而植树能减少城市地区的空气污染<sup>[3]</sup>。有研究发现北京市区的树木每年可保留 772 t PM<sub>10</sub><sup>[4]</sup>,并且针对不同树种叶表微观形态的研究发现,粗糙的叶表、高气孔数量会增加叶片滞尘量<sup>[5]</sup>。冬季的大气污染最为严重,近年来,季风等不稳定因素造成长三角地区干旱频发<sup>[6]</sup>。干旱将影响植物形态变化、生长发育和光合效率<sup>[7]</sup>,这些变化可能会影响城市植物的滞尘能力<sup>[8-9]</sup>。研究表明,干旱胁迫会增加表皮层蜡质的产量<sup>[10]</sup>。在研究不同植物蜡质层的滞尘量时发现,针叶树的滞尘量高于阔叶树种<sup>[11]</sup>,因此植物的滞尘量可能与叶片蜡质层厚度相关。Räsänen 等<sup>[12]</sup>发现干旱下云杉滞尘能力要高于正常水分下的滞尘能力。Kong 等<sup>[13]</sup>在对于干旱胁迫下红叶石楠滞尘能力变化中发现,干旱增强了植物叶片的滞尘能力。

研究表明,植物能够通过胁迫感应、渗透调节、基因改变等,快速适应反复出现的胁迫<sup>[14]</sup>,这种机制被定义为“生态胁迫记忆”<sup>[15]</sup>。通过对胁迫记忆进一步的生理机制研究发现植物可以通过联合调节提高周期性干旱的耐受性<sup>[16]</sup>。在研究跨代玉米干旱胁迫下的生理指标时,发现玉米体内可溶性糖和抗氧化酶的含量均提高,说明干旱锻炼可以提高植物的抗逆性,这表明植物体内存在胁迫记忆<sup>[17]</sup>。Li 等<sup>[18]</sup>在二次颗粒物污染导致夹竹桃的滞尘能力减少和叶绿素恢复时期的提前说明植物对颗粒物污染

胁迫产生了胁迫记忆。

本研究通过向开顶式气室注入尾气,控制土壤水分来达到尾气和干旱胁迫,探究周期性干旱下桂花的滞尘能力和生理响应的变化,为提高植被城市生态功能价值提供合适的园林管理方式。

1 材料与方法

1.1 研究站点及受试物种

本研究在浙江农林大学平山试验基地开展,周边以农村居住地及农田为主,无工业污染源,主要颗粒物污染来源为汽车尾气。试验处理期 2021 年 11 月至 2022 年 1 月大气污染物监测数据 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10.0</sub> 质量浓度分别为(51±13)μg·m<sup>-3</sup>和(78±13)μg·m<sup>-3</sup>。

桂花(*Osmanthus fragrans*)终年常绿,枝繁叶茂,树形美观,同时桂花叶面密布无规则排列的气孔,叶表面粗糙,因此滞尘能力较强<sup>[19]</sup>,有着十分广泛的园林应用。研究选用树高和基径较一致的 2 年生苗木栽植于直径 30 cm、高 28 cm 的塑料盆中,基质配比为园土:泥炭土:蛙石=7:7:6。养于浙江农林大学平山试验基地(30°15′50.61″N;119°42′54.51″E)的田间环境下约 1 a 后用于试验。

1.2 试验设计

1.2.1 试验准备 试验在 2 个相邻的开顶式气室(OTCs)中进行,选择 24 盆植株,尾气装置气室和对照气室各 12 盆,分为生理测定组和滞尘测定组,每个处理 3 个重复,植物配置详见表 1。

表 1 胁迫处理分组说明

Table 1 Group description of stress treatment

水分梯度	污染梯度	组别名称(代码)	说明
正常供水	无污染	对照组(CK)	饱和含水量,不施加尾气污染。2 盆/组,共 3 组
	重度污染	尾气污染组(P)	饱和含水量,施加(700±100)μg·m <sup>-3</sup> 的尾气 4 h/d。2 盆/组,共 3 组
干旱	无污染	干旱组(D)	自然干旱,不施加尾气污染。2 盆/组,共 3 组
	重度污染	双胁迫组(PD)	自然干旱,施加(700±100)μg·m <sup>-3</sup> 的尾气 4 h/d。2 盆/组,共 3 组

1.2.2 周期性处理 试验设置 3 个处理期和 2 个恢复期。研究发现颗粒物污染周期间隔为 1~14 d<sup>[20]</sup>,以及 Kong 等<sup>[13]</sup>研究红叶石楠周期性滞尘能力试验,本试验设置每期为 12 d,具体时间见表 2。

1.2.3 尾气处理 将幼苗随机分配到 2 个气室,分别向这 2 个气室注入尾气和清洁空气。尾气是摩托车(铃木 GS 125,125 mL 实际显示,92 号汽油)在怠速运行时产生。关于开顶式气室和排气装置更多信息,参照文献[21]。模拟了机动车尾气污染的早

晚高峰:7:00—10:00,17:00—19:00。室内  $\text{PM}_{2.5}$  质量浓度由 CPR-KA 空气质量检测仪(中国北京康尔星科技发展有限公司)实时监测。监测数据显示,污染室内污染时段的质量浓度为  $(603.68 \pm 51.33) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$  本底质量浓度为  $(42.25 \pm 18.79) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

表 2 周期性处理说明

Table 2 Periodic processing description

处理期	胁迫一期(S1)	恢复一期(R1)	胁迫二期(S2)	恢复二期(R2)	胁迫三期(S3)
日期	2021.11.16—2021.11.27	2021.11.28—2021.12.09	2021.12.10—2021.12.21	2021.12.22—2022.1.02	2022.1.03—2022.1.15

1.2.5 样本采集 每株植物随机采取 6~8 片叶片(约 5 g),装进干净的封口袋,并在 30 min 内使用液氮冷冻后将样品转移到  $-80^\circ\text{C}$  冰箱保存直至样本生理指标的测定;每株植物随机采取 8~10 片叶片,放于  $4^\circ\text{C}$  冰箱内直至滞尘指标的测定。

### 1.3 滞尘量测定

1.3.1 单位面积滞尘量测定 采用洗脱法<sup>[22]</sup>测定叶表面及蜡质层滞尘量,对 3 种颗粒进行了评估:大颗粒( $2.5 \sim 10 \mu\text{m}$ )、粗颗粒( $1.0 \sim 2.5 \mu\text{m}$ )和细颗粒( $<1.0 \mu\text{m}$ )。然后计算总颗粒重量。

在污染处理开始前的叶片滞尘量为  $m_1$ ,每个污染周期结束后叶片的滞尘量为  $m_2$ 。叶片单位面积滞尘量  $R$  为处理前后颗粒物质量  $M$  与叶面积  $S$  之间的比值差,即

$$R(\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}) = \left( \frac{m_2}{S_2} - \frac{m_1}{S_1} \right) \times 10^{-6} \quad (1)$$

式中: $S_1$  为处理前采集的叶面积( $\text{cm}^2$ ); $S_2$  为处理后采集的叶面积( $\text{cm}^2$ )。

1.3.2 单位厚度蜡质层滞尘量测定 为了研究蜡质层厚度在不同胁迫条件下滞尘能力的具体表现,本研究计算了单位厚度蜡质层  $R_w$  的滞尘量,即单位面积滞尘量  $R$  与处理前后蜡质层厚度差  $d$  之间的比值

$$R_w(\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}) = \frac{R}{d_2 - d_1} \quad (2)$$

式中: $R$  为单位面积滞尘量( $\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ ); $d_1$  为处理前叶片蜡质层厚度( $\mu\text{m}$ ); $d_2$  为处理后叶片蜡质层厚度( $\mu\text{m}$ )。

### 1.4 形态特征和生理响应

1.4.1 形态特征 试验期间,每天 17:00 观察植物形态变化,并记录重要变化和时间节点。

1.4.2 蜡质层厚度测定 将生理组采集的叶片沿中脉保留叶片 2 mm 剪下,采用徒手切片法对叶片蜡质层进行切片取样,然后用显微镜观察蜡质层厚度。

1.2.4 干旱处理 试验前通过充分浇水使所有盆栽的土壤含水量达至饱和,后通过停止供水让持续干旱的盆栽自然消耗土壤水分;而正常供水的盆栽,则在土壤含水量测定后进行补水。其中,土壤含水量使用便携式土壤水分仪 TDR100 在 17:00 测定并记录。

1.4.3 生理指标测定 叶绿素与类胡萝卜素含量、可溶性糖含量、POD 酶活性的测定参照文献[13]。

### 1.5 数据分析

数据的统计分析均在 SPSS25.0 (SPSS, IBM, USA)中完成,采用单因素方差分析或双因素方差分析比较处理间的差异。不同处理之间采用独立样本  $t$  检验。图件在 Origin2021 (Origin, OriginLab, USA)中绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 植物形态变化

在 3 个处理期中,PD 组叶片发生反卷变黄早于 P 组,说明双胁迫对植物形态变化的负效应是协同作用。S1 处理期开始 5 d 后,PD 组桂花首先出现叶片反卷和变黄,第 6 天 P 组叶片也出现反卷。S2 处理期开始后,PD 组在第 3 天出现叶片变黄,P 组则在第 5 天叶片变黄。这一时期,桂花开始抽芽,P 组新芽抽出的时间比 PD 组早 3 d;S2 胁迫处理 6 天后 PD 组桂花出现枯萎凋落而 P 组则无明显变化。S3 处理期 2 个处理组的老叶在 3 d 均出现凋落现象。

### 2.2 叶片蜡质层厚度变化

由图 1 可知,在 S1 时期 3 组蜡质层厚度分别为 D 组  $7.62 \mu\text{m}$ 、PD 组  $7.56 \mu\text{m}$ 、P 组  $7.42 \mu\text{m}$ ,3 组之间差异并没有显著性。S1 到 S2 处理结束之间蜡质层厚度持续变薄,P 组的蜡质层厚度下降程度在 S1、S2 处理均大于 PD 组(P:8.9%,PD:5.7%;P:9.3%,PD:5.7%)。D 组蜡质层厚度在处理期时上升,复水时蜡质层厚度减小。说明干旱胁迫有利于植物蜡质层的增加。

### 2.3 滞尘能力分析

2.3.1 总颗粒物增量变化 在 3 周期处理中,植物叶表的滞尘能力整体呈下降趋势,这说明颗粒物污染降低了植物叶片滞尘能力。S2 时期 P 组滞尘量下降了  $10.09 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ ,PD 组下降了  $10.83 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ ,

且PD组滞尘量总是高于P组滞尘量(图2)。PD组S2的叶面滞尘量相较S1的有显著性差异( $P=0.008$ ),S3的叶面滞尘量相较S2则无显著性下降。

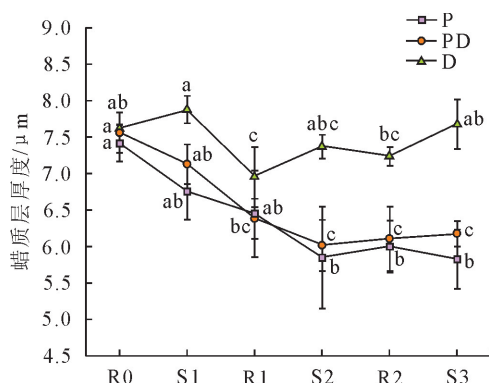


图1 试验期内蜡质层厚度变化

Fig. 1 Changes of waxy layer thickness during the experiment

S3处理结束时,PD组蜡质层滞尘量下降了 $2.64 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ ,P组蜡质层滞尘量下降了 $9.08 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ 。PD组3周期的蜡质层滞尘量逐渐减小但差异并不显著。P组的蜡质层滞尘量在S2下降幅度大且差异显著( $P=0.019$ ),S3的下降幅度小于前2周期没有显著性。不同处理期PD和P2个处理组的蜡质层滞尘量下降无显著性差异,蜡质层滞尘量和叶表滞尘量趋势均随着处理期增加而下降,可能是由于初次胁迫后叶片受损导致滞尘能力下降。

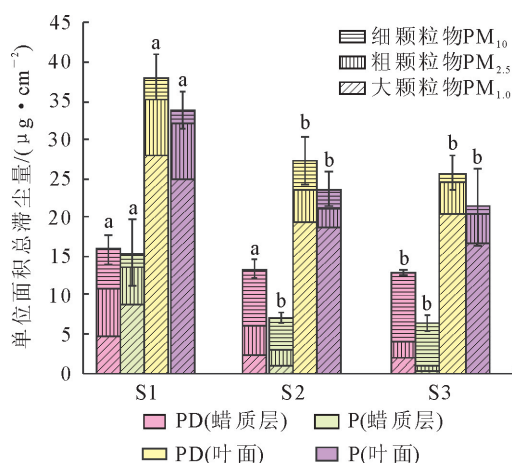


图2 不同周期单位面积总滞尘量变化

Fig. 2 Changes of total PM retention per unit area in different periods

2.3.2 单位厚度蜡质层滞尘量分析 PD组单位蜡质层厚度滞尘量比P组滞尘量高,且随着处理期增加,下降并不显著,说明干旱促进蜡质层吸附颗粒物。S1时期P组和PD组的单位厚度蜡质层滞尘量分别为 $2.65 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 和 $2.56 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ,S2时期均呈下降趋势,P组单位厚度蜡质层滞尘量达到显著下降( $P=0.019$ ),而PD组的单位厚度蜡质层滞尘量下降无显著性差异。S3时期P组和PD组的单位厚度蜡质层滞尘量与S2

时期相比均不显著(图3)。

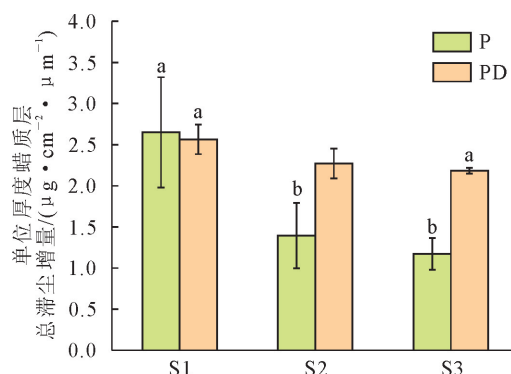


图3 不同周期单位厚度蜡质层滞尘总量变化

Fig. 3 The total PM retention per unit thickness of waxy layer in different periods

通过对2组不同颗粒物粒径分析,S1时期大颗粒物( $\text{PM}_{10}$ )和粗颗粒物( $\text{PM}_{2.5}$ )占比高于细颗粒物( $\text{PM}_{1.0}$ )占比(图4)。随着处理周期增加, $\text{PM}_{10}$ 和 $\text{PM}_{2.5}$ 占比下降, $\text{PM}_{1.0}$ 呈上升趋势。S1、S2时期P组 $\text{PM}_{10}$ 下降了 $1.45 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ,下降差异极显著( $P<0.001$ );S2到S3时期 $\text{PM}_{2.5}$ 下降了 $0.75 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ,达到显著差异( $P=0.003$ ); $\text{PM}_{1.0}$ 在S2、S3的上升趋势无显著性差异。PD组 $\text{PM}_{2.5}$ 在S1到S3时期下降了 $0.64 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ,达到显著差异( $P=0.017$ ); $\text{PM}_{1.0}$ 在S2时期达到显著上升( $P=0.009$ ),上升了 $0.56 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ ,S3时期相较S2时期增加了 $0.15 \mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ 并无显著性差异。 $\text{PM}_{10}$ 和 $\text{PM}_{2.5}$ 均随着处理周期增加而减少, $\text{PM}_{1.0}$ 随着处理周期增加而增加,且最终不同粒径颗粒物分布 $\text{PM}_{1.0}$ 占比变为最多。由此可见,蜡质层对 $\text{PM}_{1.0}$ 的吸附能力高于对 $\text{PM}_{10}$ 和 $\text{PM}_{2.5}$ 的吸附能力。

## 2.4 生理生化分析

2.4.1 叶绿素与滞尘相关性分析 P组在前2个周期叶绿素a(Chl a)、叶绿素b(Chl b)、总叶绿素(Chl T)和类胡萝卜素(Car)与叶滞尘量呈负相关,其中Chl a在S1呈极显著负相关,Chl b在S2呈极显著负相关,Chl T和Car在S2周期呈显著负相关(表3)。结果显示,S1、S2时期2组的Chl a、Chl b、Chl T和Car与滞尘量呈显著性相关,而S3时期,两者之间的相关性并不显著,这表明植物体内存在抵制反复胁迫出现的机制。

2.4.2 抗氧化酶分析 S1处理后,P组POD活性为 $215.41 \text{ U/g}$ ,PD组为 $227.52 \text{ U/g}$ ,R1恢复期复水后,POD活性均下降至原水平(图5)。S2时期,P组POD活性为 $167.24 \text{ U/g}$ ,PD组为 $161.27 \text{ U/g}$ ,R2恢复期复水后P组POD活性上升,而PD组几乎持平,S3处理后P组POD活性不变,而PD组持



续上升,这可能是由于双胁迫加强了植物体内抗氧化酶活性。试验期间,POD 活性总体呈先增加后减小再增加的趋势,S2 的上升趋势小于 S1 时期,说明

随着处理周期的增加植物体内的自由基在减少。

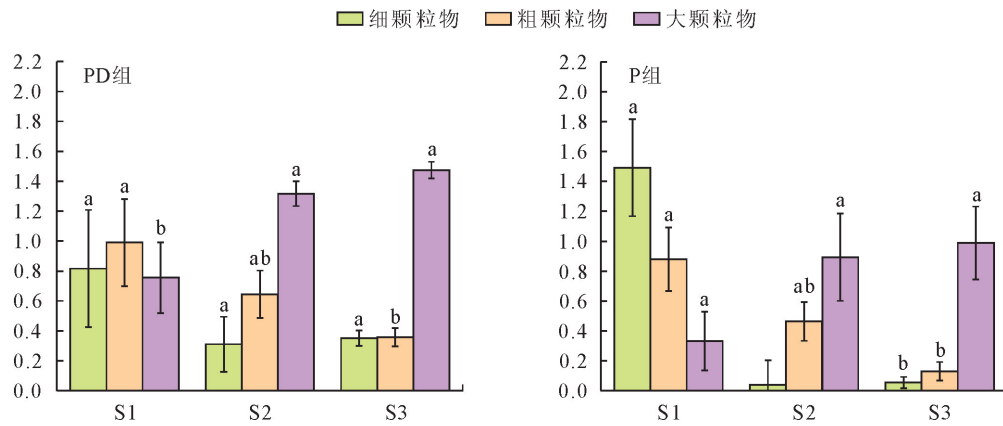


图4 不同处理单位厚度蜡质层不同粒径滞尘量变化

Fig. 4 Different particle sizes PM retention of waxy layer with per unit thickness in different periods

表1 3 叶绿素与滞尘量相关性分析

Table 3 Analysis of correlation between chlorophyll and PM retention

周期		S1		S2		S3	
		<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>
P	Chla	-0.941 **	0.005	-0.858 *	0.029	0.729	0.101
	Chlb	-0.817 *	0.004	-0.955 **	0.003	0.313	0.546
	Chl T	-0.639	0.127	-0.823 *	0.044	0.620	0.198
	Car	-0.298	0.566	-0.883 *	0.020	0.446	0.376
PD	Chla	-0.304	0.558	-0.920 **	0.009	-0.116	0.826
	Chlb	-0.656	0.158	-0.954 **	0.003	-0.355	0.490
	Chl T	-0.413	0.416	-0.933 **	0.007	-0.189	0.720
	Car	-0.126	0.812	-0.959 **	0.003	-0.189	0.720

注:Chl a 为叶绿素 a, Chl b 为叶绿素 b, Chl T 为总叶绿素, Car 为类胡萝卜素。P 组为正常供水下的尾气暴露, PD 组为持续干旱下的尾气暴露。\* 表示相关性显著, \*\* 表示相关性极显著。

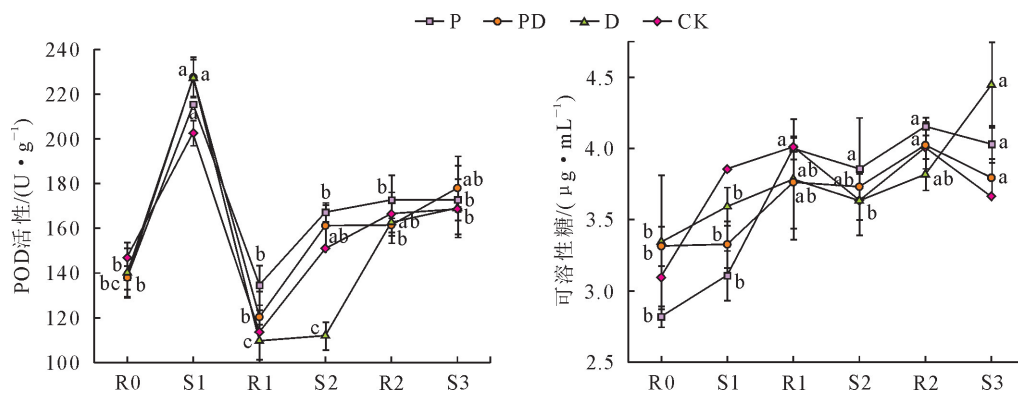


图5 不同周期 POD 酶活性、可溶性糖变化

Fig. 5 POD enzyme activity and soluble sugar changes in different periods

2.4.3 可溶性糖分析 整个试验处理期间 P 组可溶性糖上升了  $1.21 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ , PD 组上升了  $0.48 \mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ 。在所有恢复期,可溶性糖含量均升高。S1 处理后 3 组处理组可溶性糖均上升但并不显著,S2 时期可溶性糖比处理前有所下。这表明植物应对再次胁迫时,会产生相应的抵抗机制,降低可溶性糖含量。S3 时期 D 组的可溶性糖含量升高,P 组和 PD 组可溶性糖含量仍然下降,可能是颗粒物覆盖

所导致。

### 3 讨论

#### 3.1 植物形态变化

本研究中,植物形态变化主要发生在叶片形态和叶片颜色上。试验中,污染处理后,PD 组桂花较 P 组先出现叶片颜色变黄,这可能是由于植物受干旱胁迫,叶绿素减少导致叶片变黄<sup>[23]</sup>,随后 P 组叶

片变黄,这是由于桂花受颗粒物胁迫使叶绿体容易受到氧化胁迫的影响,同时颗粒物覆盖叶表面,阻塞了气孔也可导致叶绿素的降解<sup>[24]</sup>,因此叶片变黄。在S2时期,桂花开始抽芽,但PD组抽芽时间晚于P组,原因可能是叶片对于干旱的反应促进脱落酸的分泌,而脱落酸的分泌会延缓发芽<sup>[25-26]</sup>。通过对叶片蜡质层厚度观测发现,P组和PD组的蜡质层厚度与蜡质层滞尘量显著相关( $P:r=0.702, P=0.035$ ;  $PD:r=0.772, P=0.015$ ),这说明颗粒物污染减少了植物表皮蜡质层<sup>[27]</sup>。

### 3.2 滞尘能力变化

在3周期的处理中,桂花叶片表面和蜡质层滞尘量均逐渐减少,尤其在S2处理期后P组和PD组桂花叶表面的滞尘量相较S1时期都发生了显著性减少。这可能是经过上一阶段颗粒物胁迫后,桂花的叶表面结构受到颗粒物污染的破坏,降低了植物本身的滞尘能力。植物滞尘量的减少是植物面对胁迫表现出适应的结果,研究表明,植物可以通过蒸腾作用改变气流方向来减少颗粒物附着<sup>[18,28]</sup>。3个处理期PD组的滞尘量大于P组的颗粒物滞留量,我们推测反复的干旱胁迫加强了植物增厚蜡质层的能力,S3时期桂花已经表现出较为明显的适应性,PD组的蜡质层厚度开始上升,这有利于提高桂花的滞尘能力。

从不同粒径颗粒物滞尘能力来看, $PM_{10}$ 和 $PM_{2.5}$ 的滞尘能力随着周期处理而下降,单位厚度蜡质层滞留的 $PM_{1.0}$ 随着处理增加而上升,并且PD组上升较P组具有显著性,说明蜡质层更有利于吸附细小颗粒物<sup>[29]</sup>。蜡质层是保护植物叶片不吸收纳米颗粒物的屏障,细颗粒物被吸收在蜡质层中造成蜡质层中细颗粒物含量最高<sup>[30]</sup>。

### 3.3 生理响应和适应

抗氧化酶活性高有利于植物体内活性氧(ROS)的清除<sup>[31]</sup>,刚开始植物体内的POD活性升高,说明植物受胁迫而增强自身氧化酶,随着周期增加,植物体内POD活性逐渐下降,说明植物体内活性氧含量越来越低。3个处理期PD组POD活性增加趋势大于P组,这说明颗粒物可降低干旱带来的氧化胁迫。孙等<sup>[32]</sup>发现,纳米颗粒物增强了植物渗透调节作用,通过增加激活抗氧化酶系统来清除ROS,从而减少了干旱诱导的脂质过氧化物。可溶性糖在S1时期上升,是桂花受到胁迫调节体内渗透压所导致的。而S2、S3时期可溶性糖下降,可能是由于颗粒物的覆盖,植物呼吸作用大于光合作用,植物自身消耗可溶性糖,同时尾气中含有 $SO_x$ 和 $NO_x$ 也可降低植物体内可溶性糖含量<sup>[33]</sup>。

由于颗粒物覆盖气孔,叶温升高,导致叶绿素在S1时期降低<sup>[34]</sup>。也有可能是摩托车尾气中的 $SO_2$ 和 $O_3$ 降低了桂花体内叶绿素含量<sup>[35]</sup>。叶绿素和类胡萝卜素含量与滞尘量的相关性在前2个处理期逐渐加强而在S3时期减弱,这表明二次胁迫时,植物的胁迫生理响应比第一周期严重,这与之前李铭等<sup>[18]</sup>研究二次污染对夹竹桃生理响应一致,有可能是植物在恢复期时间内未恢复到之前的参照状态<sup>[36]</sup>。S3时期相关性减弱可能是植物受到反复胁迫,建立了对这种胁迫耐受机制,从而做出了更好的反应<sup>[37]</sup>。

## 4 结论

S1处理期间,PD组较P组先出现叶片变黄脱落现象。P组的蜡质层厚度下降幅度大于PD组。二次胁迫会加速植物形态变化出现的时间。

PD组的叶面滞尘量和蜡质层滞尘量均大于P组,P组蜡质层滞尘量呈显著下降( $P=0.019$ ),而PD组蜡质层滞尘量下降并不显著。P组、PD组的单位厚度蜡质层总滞尘量均随着处理周期而下降,但单位厚度细颗粒物滞尘量随着处理期上升。

P组和PD组抗氧化酶活性在S1时期均显著升高,S2时期增幅没有显著性,S3时期,P组活性降低,PD组呈略上升趋势,复水后植物体内抗氧化酶活性降低。S1时期,P组PD组植物体内可溶性糖含量有所上升( $P:+0.29, PD:+0.001$ ),S2、S3时期,P组PD组植物体内可溶性糖含量均下降。

### 参考文献:

- [1] WANG W X, CHAI F H, ZHANG K, *et al.* Study on ambient air quality in Beijing for the summer 2008 Olympic Games[J]. Air Quality, Atmosphere & Health, 2008, 1(1): 31-36.
- [2] MACÊDO M F M, RAMOS A L D. Vehicle atmospheric pollution evaluation using AERMOD model at avenue in a Brazilian capital city[J]. Air Quality, Atmosphere & Health, 2020, 13(3): 309-320.
- [3] 王嘉琦, 睿王, 王得祥. 春季不同类型城市滨水绿地的微气候与人体舒适度研究[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(3): 231-236.
- [4] YANG J, MCBRIDE J, ZHOU J X, *et al.* The urban forest in Beijing and its role in air pollution reduction[J]. Urban Forestry and Urban Greening, 2005, 3(2): 65-78.
- [5] 王军梦, 汪安印, 王翼飞, 等. 不同污染程度下树种滞尘能力与叶表微形态关系研究[J]. 林业调查规划, 2022, 47(5): 16-21, 37.
- [6] 夏军, 陈进, 余敦先. 2022年长江流域极端干旱事件及其影响与对策[J]. 水利学报, 2022, 53(10): 11.
- [7] HURA T, DZIURKA M, HURA K, *et al.* Different allocation of carbohydrates and phenolics in dehydrated leaves of triticale[J]. Journal of Plant Physiology, 2016, 202: 1-9.
- [8] HANSLIN H M, PRZYBYSZ A, SLIMESTAD R, *et al.* Stress

- acclimation and particulate matter accumulation in *Pinus sylvestris* saplings affected by moderate combinations of urban stressors[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 593-594: 581-591.
- [9] RASANEN J V, HOLOPAINEN T, JOUTSENSAARI J, *et al.* Effects of species-specific leaf characteristics and reduced water availability on fine particle capture efficiency of trees[J]. *Environmental Pollution*, 2013, 183(Dec.): 64-70.
- [10] PRIOR S, PRITCHARD S, RUNION G, *et al.* Influence of atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment, soil N, and water stress on needle surface wax formation in *Pinus palustris* (Pinaceae)[J]. *American Journal of Botany*, 1997, 84(8): 1070-1077.
- [11] 李朝梅, 王军梦, 王腾飞. 郑州市常见公园绿化植物的滞尘能力及叶片性状分析[J]. *西北林学院学报*, 2021, 36(2): 123-129.
- [12] RÄSÄNEN J V, YLI-PIRILÄ P, HOLOPAINEN T, *et al.* Soil drought increases atmospheric fine particle capture efficiency of Norway spruce[J]. *Boreal Environment Research*, 2012, 17(1): 21-30.
- [13] KONG Q W, ZHANG J, CHEN S, *et al.* Effects of periodic drought with severe exhaust exposure on particle retention capacity and physiological responses of *Photinia × fraseri* Dress[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, 241: 113807.
- [14] DING Y, LIU N, VIRLOUVET L, *et al.* Four distinct types of dehydration stress memory genes in *Arabidopsis thaliana* [J]. *BMC Plant Biology*, 2013, 13: 229.
- [15] KINOSHITA T, SEKI M. Epigenetic memory for stress response and adaptation in plants[J]. *Plant & Cell Physiology*, 2014, 55(11): 1859-1863.
- [16] CANARINI A, SCHMIDT H, FUCHSLUEGER L, *et al.* Ecological memory of recurrent drought modifies soil processes via changes in soil microbial community[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 5308.
- [17] 王霞, 尹晓雨, 于晓明, 等. 玉米跨代干旱胁迫记忆生理机制及DNA甲基化变化分析[J]. *西北植物学报*, 2021, 41(10): 1692-1699.
- [18] LI M, HUANG D, ZHOU Y H, *et al.* The legacy effects of PM<sub>2.5</sub> deposition on *Nerium oleander* [J]. *Chemosphere*, 2021, 281: 130682. 1-130682. 8.
- [19] 李晓璐, 叶锦东, 章剑, 等. 乔木滞留大气颗粒物能力及其与叶表面微结构关系[J]. *中国城市林业*, 2022, 20(3): 22-28.
- [20] HUANG F, LI X, WANG C, *et al.* PM<sub>2.5</sub> Spatiotemporal variations and the relationship with meteorological factors during 2013–2014 in Beijing, China[J]. *PLoS One*, 2015, 10(11): e0141642.
- [21] ZHOU M, WANG X, LIN X, *et al.* Automobile exhaust particles retention capacity assessment of two common garden plants in different seasons in the Yangtze River Delta using open-top chambers[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 263 (Aug.): 114560.
- [22] SAEBO A, POPEK R, NAWROT B, *et al.* Plant species differences in particulate matter accumulation on leaf surfaces[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 427-428: 347-354.
- [23] INES M, MARIJA V V, DOMAGOJ Š. Comparative study of drought stress effects on traditional and modern apple cultivars[J]. *Plants*, 2021, 10: 561.
- [24] KAUR M, NAGPAL A K. Evaluation of air pollution tolerance index and anticipated performance index of plants and their application in development of green space along the urban areas[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(23): 18881-18895.
- [25] DORIA A, JING L, ARKOUN M, *et al.* Transcriptomic, metabolomic and ionic analyses reveal early modulation of leaf mineral content in brassica napus under mild or severe drought[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2022, 23(2): 781.
- [26] RICHARDSON W C, BADRAKH T, ROUNDY B A, *et al.* Influence of an abscisic acid (ABA) seed coating on seed germination rate and timing of bluebunch wheatgrass[J]. *Ecology and Evolution*, 2019, 9(13): 7438-7447.
- [27] BURKHARDT J, PARIYAR S. Particulate pollutants are capable to ‘degrade’ epicuticular waxes and to decrease the drought tolerance of scots pine (*Pinus sylvestris* L.) [J]. *Environmental Pollution*, 2014, 184(Jan.): 659-667.
- [28] KWON K J, KWON H J, OH Y A, *et al.* Particulate matter removal of three woody plant species, *Ardisia crenata*, *Ardisia japonica*, and *Maesa japonica* [J]. *Sustainability*, 2021, 13 (19): 11017.
- [29] DZIERŻANOWSKI K, POPEK R, GAWROŃSKA H, *et al.* Deposition of particulate matter of different size fractions on leaf surfaces and in waxes of urban forest species[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2011, 13(10): 1037-1046.
- [30] SHABNAM N, OH J, PARK S, *et al.* Impact of particulate matter on primary leaves of *Vigna radiata* (L.) R. Wilczek[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 212: 111965.
- [31] LUKIĆ N, KUKAVICA B, DAVIDOVIĆ-PLAVŠIĆ B, *et al.* Plant stress memory is linked to high levels of anti-oxidative enzymes over several weeks[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2020, 178: 104166.
- [32] SUN L, SONG F, GUO J, *et al.* Nano-ZnO-induced drought tolerance is associated with melatonin synthesis and metabolism in Maize[J]. *International Journal of Molecular Sciences*, 2020, 21(3): 782.
- [33] RAI P K, PANDA L L S. Roadside plants as bio indicators of air pollution in an industrial region, Rourkela, India[J]. *Journal of Advanced Research*, 2015, 4(1): 14-36.
- [34] JOSHI P C, SWAMI A. Physiological responses of some tree species under roadside automobile pollution stress around city of Haridwar, India[J]. *Environmentalist*, 2007, 27(3): 365-374.
- [35] KHAN M R, KHAN M W. Single and interactive effects of O<sub>3</sub> and SO<sub>2</sub> on tomato[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 1994, 34(4): 461-469.
- [36] WALTER J, Jentsch A, Beierkuhnlein C, *et al.* Ecological stress memory and cross stress tolerance in plants in the face of climate extremes[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2013, 94 (Oct.): 3-8.
- [37] MUNNÉ-BOSCH S, ALEGRE L. Cross-stress tolerance and stress “memory” in plants: an integrated view[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2013, 94(Jan): 1-2.